

УДК [517:536]:621.452

**В.Е. КОСТЮК**, канд. техн. наук; НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**Е.И. КИРИЛАШ**, м.н.с. НАКУ «ХАИ», Харьков

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ УКРЫТИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА**

Разработаны общая постановка задачи о тепловом состоянии укрытия ГТД для привода ГПА и соответствующая ей математическая модель. Результаты численного моделирования показали высокую чувствительность расчётных оценок температур ограждающих конструкций укрытия к температурам наружной поверхности корпуса двигателя и степеням черноты поверхностей твёрдых тел.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, шумотеплозащитное укрытие, вентиляция, охлаждение, течение и тепломассообмен, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, уравнение переноса излучения, метод контрольных объемов, метод дискретных ординат, температурные поля.

#### **Введение**

В настоящее время на компрессорных станциях (КС) широко применяются газоперекачивающие агрегаты (ГПА) с газотурбинными двигателями (ГТД) в качестве привода. Для защиты персонала КС от шума, тепловых и механических воздействий, а также охлаждения корпуса ГТД последний размещают в укрытии, оснащённом системой вентиляции. Однако при вентиляции пространства внутри укрытия возникает ряд проблем. В частности односторонняя подача охлаждающего воздуха может повлечь за собой неравномерное распределение газодинамических параметров внутри укрытия, температур на поверхностях его стенок и неравномерное охлаждение корпуса ГТД в поперечном направлении. Это может привести к повышению температуры в застойных областях и локальному перегреву стенок укрытия, что отрицательно скажется на работе оборудования и аппаратуры, и даже к разрушению двигателя из-за изгиба его корпуса, обусловленного разностью температур его поверхностей. Последнее особенно характерно для авиапроизводных ГТД с их тонкостенными корпусами. В связи с этим разработка рациональных конструкций укрытий ГТД и эффективных систем их вентиляции является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Традиционно проектирование и доводка систем охлаждения ГТД и вентиляции укрытий выполнялись без применения современных методов гидравлических и тепловых расчётов. Это обуславливало повышенный объём испытаний, из-за чего увеличивались сроки и стоимость опытно-конструкторских работ. Простейшие одномерные математические модели (ММ) теплового баланса не дают информации о локальных скоростях и температурах охлаждающего воздуха в укрытии, так как они оперируют лишь средними величинами. Делались попытки достичь компромисса между требованием адекватности ММ и возможностью её использования при проектировании. Например, в работе [1] предложена одномерная модель газового объёма с искусственным учётом эффектов струйных течений. Данная модель не даёт полного описания распределения температур, однако предоставляет возможность получения не только среднеобъёмной температуры воздуха в укрытии, но и перепада температуры по его высоте.

В настоящее время, в связи с развитием методов вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД), появилась возможность подробного моделирования

© В.Е. Костюк, Е.И. Кирилаш, 2013

физических процессов в формулировке краевых задач. Так, авторами работ [2–9] выполнены численные исследования отдельных аспектов, определяющих тепловое состояние укрытий ГТД, в трёхмерной постановке.

Задание адекватных граничных условий (ГУ) при моделировании теплового состояния укрытия ГТД методами ВАГД является нетривиальной проблемой, от способа решения которой непосредственно зависит точность численного решения. Как правило, наиболее корректно задать термические ГУ удаётся в задачах, решаемых в сопряжённой постановке [10]. Однако такая постановка задачи о тепловом состоянии укрытия ГТД предполагает включение в состав расчётной области всех твёрдых тел (ТТ) с протекающими внутри них и (или) омывающими их вентиляционным воздухом (ВВ), цикловым воздухом (ЦВ), выхлопными газами (ВГ), топливным газом, маслом, а также примыкающим к укрытию фрагментом атмосферного воздуха (АВ), что неприемлемо как по потребным вычислительным ресурсам, так и по многообразию и сложности явлений, происходящих в столь обширной системе. ММ должна адекватно описывать существенные аспекты явлений, но быть достаточно простой, чтобы её можно было применить на практике, что достигается введением упрощающих предположений (допущений), в том числе в отношении моделируемой части пространства и обусловленных ею ГУ.

При ограничении моделируемой части пространства ВВ с постановкой на всех её границах термических ГУ первого и (или) второго рода в отношении температуры поверхностей ТТ, обращённых внутрь укрытия и (или) тепловых потоков приходится делать допущения, опираясь на данные температурных измерений (например, полагать ограждающие конструкции укрытия (ОКУ) изотермическими [4, 6] или адиабатическими [2, 5], рассматривать двигатель как источник тепла с постоянным тепловыделением [6] или же представлять его наружные поверхности в виде набора корпусов с заданными температурами [4, 5]). Следует заметить, что использование данных измерений, выполняемых «постфактум», в определённом смысле противоречит идее прогнозирования теплового состояния укрытия. Кроме того, данный подход исключает возможность расчёта температуры наружных поверхностей ОКУ, хотя данная температура представляет особый интерес для конструктора, поскольку её максимальное значение ограничено нормами охраны труда.

Более адекватный и в то же время приемлемый для инженерной практики подход заключается в одномерном моделировании твёрдотельной теплопроводности ОКУ с заданием на их наружных поверхностях конвективных ГУ третьего рода, как было сделано в работах [7, 8]. Это позволяет рассчитать температуру наружных поверхностей укрытия, полагая коэффициенты теплоотдачи от этих поверхностей к омывающему их АВ известными. В условиях низкой теплопроводности ОКУ и естественной конвекции снаружи него, такие ГУ оказываются достаточно консервативными для их успешного практического использования.

Очевидно, что аналогичное описание остальных ТТ, находящихся в укрытии, может способствовать увеличению адекватности ММ. В частности постановка ГУ третьего рода на корпусе двигателя, позволила бы обойти проблему коррекции экспериментально измеренной термограммы в зависимости от режима работы двигателя и интенсивности его обдува ВВ, возникающую при использовании ГУ первого [9] и (или) второго рода. При этом коэффициенты теплоотдачи к внутренней поверхности корпуса двигателя от омывающих её ЦВ и ВГ могут быть рассчитаны по соответствующим критериальным уравнениям с использованием данных термогазодинамического расчёта двигателя. Серьёзным препятствием для реализации

такого подхода в рамках простейшей одномерной ММ твёрдотельной теплопроводности является использование в реальных конструкциях ГТД локально неоднородных многослойных корпусов с подводом и отводом охлаждающего воздуха в межслойные полости, в том числе в полость с расположенной внутри неё излучающей жаровой трубой. Указанная трудность может быть преодолена переходом к моделированию в «полусопряжённой» (по терминологии Н.Н. Кортикова [11]) постановке, как это было сделано в работе [3], где задавались ГУ третьего рода на корпусе ГТД, а теплопроводность через корпус рассчитывалась в трёхмерной постановке.

На тепловое состояние укрытия, наряду с находящимися в нём двигателем и оборудованием, также существенно влияет улитка. В работах [4, 5] на поверхности улитки задавались ГУ первого рода. Следует отметить, что если стенки улитки имеют достаточно простую конструкцию и толщину, существенно меньшую её габаритов, то более рациональным представляется моделирование теплопередачи через стенку улитки в сопряжённой постановке с одномерным моделированием твёрдотельной теплопроводности. Исследования теплового состояния укрытий ГТД, выполненные в такой постановке, авторам не известны.

Исследование [7] подтверждает существенный вклад лучистого теплообмена в тепловое состояние стенок укрытия ГТД. Поэтому при задании ГУ лучистого теплообмена важно использовать достоверные значения излучательной способности (степени черноты) поверхностей ТТ. Степень черноты является сложной функцией, зависящей от множества факторов. При отсутствии экспериментальных данных выбор достоверных численных значений степеней черноты конкретных поверхностей из широкого диапазона справочных данных при том, что состояние поверхности, степень окисления и тому подобные факторы, как правило, характеризуются лишь качественно, затруднителен. В известных работах [3, 7, 8], в которых моделировалось излучение ТТ в укрытиях ГТД, выбор степени черноты их поверхностей не комментируется.

На тепловое состояние укрытия также влияют тепловыделения от поверхностей расположенных в нём оборудования, агрегатов, приборов, трубопроводов, электропроводов, а также утечки рабочего тела из корпуса двигателя. В работе [3] дополнительные тепловыделения учитывались заданием температуры поверхностей элементов вспомогательного оборудования и трубопроводов. В работе [5] учтены утечки горячего воздуха из ГТУ. Однако вопросы определения температур поверхностей, мест расположения утечек и расходов рабочего тела, использованных в качестве ГУ, не освещены.

Таким образом, в известных исследованиях отсутствует обобщённый подход к численному моделированию теплового состояния укрытий ГТД методами ВАГД, а вопросы обеспечения корректности и достоверности ГУ соответствующей краевой задачи до настоящего времени не рассматривались.

Цель настоящей работы – сформулировать общую постановку задачи о тепловом состоянии укрытия ГТД, разработать соответствующую ММ и оценить с её помощью влияние термических ГУ на распределение температуры твёрдых и газообразных тел в объёме укрытия.

### **Общая постановка задачи о тепловом состоянии укрытия ГТД**

Под тепловым состоянием укрытия ГТД будем понимать распределение температуры составляющих его твёрдых и заполняющих его газообразных тел в пространстве и её изменение во времени. В общем случае целью моделирования

теплого состояния укрытий ГТД для привода ГПА является определение температуры, скорости и направления движения ВВ внутри укрытия, а также температуры внутренних и наружных стенок укрытия в произвольных точках при установившихся и неуставившихся (в том числе аварийных) режимах его эксплуатации в составе ГПА блочно-контейнерного и ангарного исполнения с учётом теплового излучения нагретых элементов оборудования, находящегося в укрытии, а также утечек ЦВ (ВГ) из проточной части ГТД.

Рассмотрим окружённое внешней средой оснащённое системой вентиляции укрытие ГТД с размещёнными внутри него двигателем, оборудованием и улиткой как систему, состоящую из следующих энергетически взаимосвязанных элементов:

- двигатель;
- оборудование;
- улитка;
- ОКУ;
- ВВ;
- ВГ;
- утечки ЦВ (ВГ);
- АВ;
- теплоизлучающие тела, окружающие укрытие;
- теплопроводная среда, расположенная под полом укрытия.

На рис. 1 показана упрощенная схема теплового баланса укрытия, отражающая энергетические связи между элементами системы.

Энергетические связи (перенос энергии в форме теплоты) между элементами системы обусловлены следующими физическими явлениями:

- трёхмерным вязким течением ВВ внутри укрытия;
- смешением ВВ с утечками ЦВ (ВГ);
- конвективным теплообменом между ВВ и омываемыми им поверхностями;
- конвективным теплообменом между АВ и наружными поверхностями ОКУ;
- конвективным теплообменом между ВГ и внутренними поверхностями улитки;
- теплопроводностью корпуса улитки и ОКУ;
- лучистым теплообменом между поверхностями, обращёнными внутрь укрытия;
- лучистым теплообменом между окружающей средой и наружными поверхностями ОКУ;
- лучистым теплообменом между ВГ и внутренними поверхностями улитки.

### Математическая модель теплового состояния укрытия ГТД

Описание совокупности перечисленных выше физических явлений требует привлечения разнородных ММ для описания состояния отдельных физических

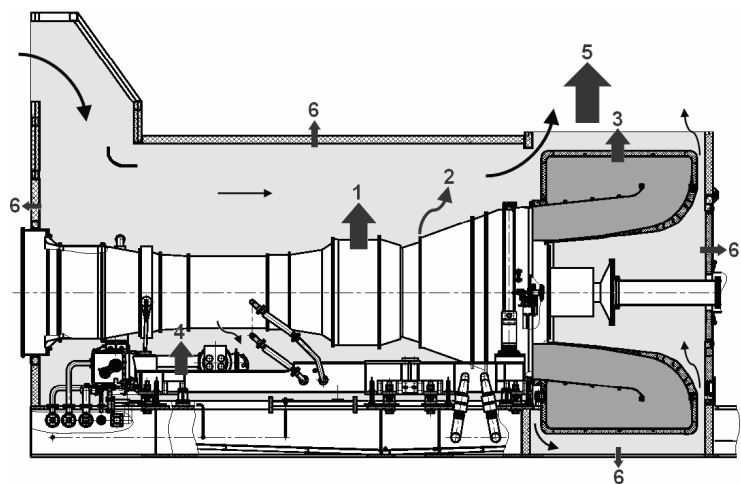


Рис. 1 – Схема теплового баланса укрытия:

- 1 – теплоступления от двигателя;
- 2 – теплоступления за счёт утечек ЦВ (ВГ);
- 3 – теплоступления от улитки; 4 – теплоступления от оборудования; 5 – теплоступления за счёт воздухообмена;
- 6 – теплоступления через ОКУ

подсистем исследуемой сложной системы. Так, явления вязкого течения, смешения и конвективного теплообмена могут быть описаны системой уравнений неразрывности для бинарной смеси в целом (1), сохранения массы инертной примеси (2), сохранения количества движения в форме Навье-Стокса (3) и сохранения энергии (4), замыкаемой уравнением состояния (5), явление теплопроводности в ТТ – уравнением сохранения энергии в форме уравнения теплопроводности (4а), явление лучистого теплообмена – уравнением переноса излучения в форме (6) для излучающей среды (ВГ) или в форме (6а) для диатермичной среды (ВВ и ЦВ):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial Y}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y}{\partial x_i} = \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial^2 Y}{\partial x_i^2}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j, \quad i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial h}{\partial x_i} = \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial^2 h}{\partial x_i^2} + \frac{\partial q_i^R}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (4a)$$

$$p = \rho RT / M; \quad (5)$$

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + I(\vec{r}, \vec{s}) = (1 - \omega_0) I_b(\vec{r}) + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega'; \quad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial s} = 0, \quad (6a)$$

где  $u_i, u_j$  – составляющие вектора скорости в направлении соответствующих осей декартовых координат  $x_i, x_j$ ;  $\rho$  – плотность;  $Y$  – массовая доля инертной примеси;  $t$  – время;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $Sc \equiv \mu/D\rho$  – число Шмидта;  $D$  – коэффициент диффузии;  $p$  – давление;  $g_j$  – составляющая ускорения свободного падения в направлении оси  $x_j$ ;  $h = \int_{T^0}^T c_p(T) dT$  – удельная энтальпия;  $T$  – температура газа;  $T^0$  – стандартная температура;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость газа;  $Pr \equiv \mu c_p / \lambda$  – число Прандтля;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $q_i^R$  – составляющая плотности потока теплового излучения в направлении оси  $x_i$ ;  $a \equiv \lambda / \rho c$  – коэффициент температуропроводности;  $c$  – удельная теплоёмкость твёрдого тела;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M$  – кажущаяся молекулярная масса смеси;  $\beta_0 = k_a + \sigma_s$  – объёмный

коэффициент затухания;  $k_a$  – объёмный коэффициент поглощения;  $\sigma_s$  – объёмный коэффициент рассеяния;  $I$  – интенсивность теплового излучения;  $\vec{r}$  – радиус-вектор произвольного луча в направлении распространения теплового излучения  $\vec{s}$ ;  $\omega_0 = \sigma_s/\beta_0$  – альбедо рассеяния;  $I_b = \sigma T^4/\pi$  – интенсивность теплового излучения абсолютно чёрного тела;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\Omega'$  – единичный вектор телесного угла, характеризующий направление распространения теплового излучения вследствие рассеяния фотонов  $\vec{s}'$ .

Уравнения (1)–(4) записаны, исходя из допущения о том, что эффекты сжимаемости, вязкого нагрева, термо-, баро- и самодиффузии пренебрежимо малы [12]. Уравнение (6) записано, исходя из допущения о квазистационарном, когерентном и изотропном переносе излучения [13]. Используя дополнительное допущение о близости теплофизических свойств ВВ, ЦВ и ВГ, можно исключить из анализа явление их смешения, и соответственно – уравнение (2) из ММ теплового состояния укрытия. Принимая во внимание, что массовая доля трёхатомных газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в ВГ меньше массовой доли двухатомных газов ( $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ ) на порядок величины, можно принять дополнительное допущение о диатермичности не только ВВ и ЦВ, но и ВГ, и соответственно повсеместно использовать уравнение (6а), исключив тем самым уравнение (6) из ММ теплового состояния укрытия.

Для учёта турбулентного характера движения ВВ и ВГ используем гипотезу Буссинеска о турбулентной вязкости и применим к уравнениям (1), (3), (4) процедуру осреднения по Рейнольдсу [12]. Для замыкания получившейся системы осреднённых уравнений, совпадающих по форме с исходными уравнениями (1), (3), (4), если под величинами  $\mu$  и  $\text{Pr}$  понимать коэффициент турбулентной вязкости и турбулентное число Прандтля соответственно и полагать, что турбулентная вязкость существенно больше динамической, используем модель турбулентности Лаундера-Сполдинга [14]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k}{\partial x_i^2} + G_k + G_b - \rho \epsilon, \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} + (C_{\epsilon 1}(G_k + G_b) - C_{\epsilon 2}\rho\epsilon) \frac{\epsilon}{k}, \quad (8)$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\mu_t = c_\mu \rho k^2/\epsilon$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  и  $G_b = \mu_t \frac{1}{\text{Pr}_t} \frac{g_i}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$  – источниковые члены, обусловленные вязкостными напряжениями и плавучестью соответственно;  $\text{Pr}_t \equiv \mu_t c_p / \lambda_t$  – турбулентное число Прандтля;  $\lambda_t$  – коэффициент турбулентной теплопроводности;  $\epsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;  $c_\mu$ ,  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  – эмпирические коэффициенты.

Система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) (1), (3), (4), (4а), (6а), (7) и (8), дополненная алгебраическим уравнением (5) и соответствующими краевыми условиями, однозначно описывает тепловое состояние укрытия ГТД в рамках принятых допущений и может быть решена методами ВАГД.

**Исследование влияния термических ГУ на распределение температуры твёрдых и газообразных тел в объёме укрытия**

С помощью разработанной ММ решена задача о вязком квазистационарном трёхмерном турбулентном течении двух однокомпонентных сред переменной плотности (ВВ и ВГ) в проточных частях укрытия и улитки соответственно, отделённых друг от друга и окружающей среды непроницаемыми стенками, с учётом смешанного конвективного теплообмена, лучистого теплообмена и теплопроводности через стенки.

Для исследования влияния термических ГУ на распределение температуры твёрдых и газообразных тел, входящих в состав укрытия, решены две задачи, различавшиеся ГУ:

а) задача № 1: термограмма корпуса двигателя, измеренная в условиях без обдува его охлаждающим воздухом (рис. 2); высокие степени черноты поверхностей ТТ (таблица);

б) задача № 2: гипотетическая термограмма с уменьшенными на 10 % температурами участков наружной поверхности корпуса двигателя, имитирующая обдув его охлаждающим воздухом (рис. 2); меньшие степени черноты поверхностей ТТ (таблица).

Относительный подогрев наружных поверхностей стенок определялся по формуле

$$\bar{\Theta} = (T - T_{\text{в}}) / (T_{\text{max}} - T_{\text{в}}), \quad (9)$$

где  $T$  – температура наружной поверхности стенки;  $T_{\text{в}}$  – температура ВВ на входе в проточную часть укрытия;  $T_{\text{max}}$  – максимальная температура наружных поверхностей стенок.

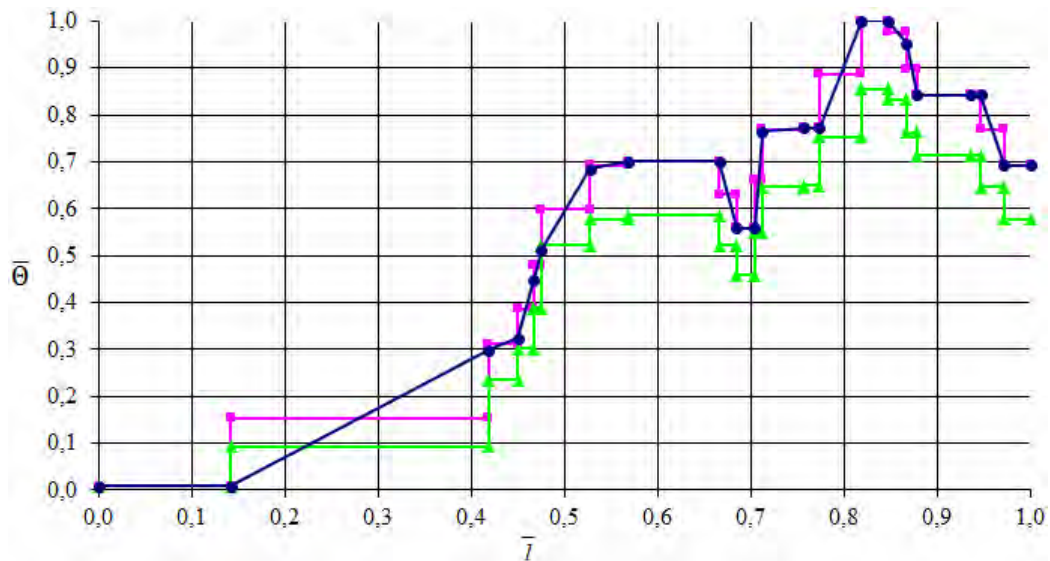
Таблица

Степень черноты поверхностей твёрдых тел

Поверхность	Задача № 1	Задача № 2
Стенки входного участка и кожуха муфты	0,75	0,30
Стенки ОКУ	0,80	0,35
Стенки улитки	0,75	0,30
Поверхности корпуса двигателя и подмоторной рамы	0,80	0,60

Численное решение задачи отыскивалось в трёхмерной области пространства, охватывавшей проточные части укрытия и улитки, которая покрывалась гибридной расчётной сеткой, включавшей около 3 млн. ячеек.

На входах в проточные части укрытия и улитки задавались направление течения, массовые расходы и температуры ВВ и ВГ, параметры турбулентности. На выходах задавалось нулевое избыточное статическое давление. На всех поверхностях ТТ, омываемых вязким потоком, задавалось ГУ «прилипания» с использованием эмпирических пристеночных функций в модели турбулентности. На наружной поверхности корпуса двигателя задавались термические ГУ первого рода – распределение температуры на поверхности тела, принимавшееся кусочно-постоянным в соответствии с термограммой (см. рис. 2). На наружных поверхностях ОКУ задавались термические ГУ третьего рода с одномерной моделью твердотельной теплопроводности: температура окружающей среды и закон теплообмена Ньютона-Рихмана между поверхностью укрытия и окружающей средой, характеризуемый коэффициентом теплоотдачи. В модели одномерной твёрдотельной теплопроводности стенок улитки и ОКУ задавались их толщины и коэффициенты теплопроводности.



- – термограмма, измеренная в условиях испытательного бокса без обдува двигателя;
- – термограмма, аппроксимирующая измеренную кусочно-постоянной функцией (задача № 1);
- ▲ – гипотетическая термограмма с уменьшенными на 10 % температурами участков, имитирующая обдув двигателя охлаждающим воздухом (задача № 2)

Рис. 2 – Изменение относительного подогрева участков наружных поверхностей корпуса двигателя по его

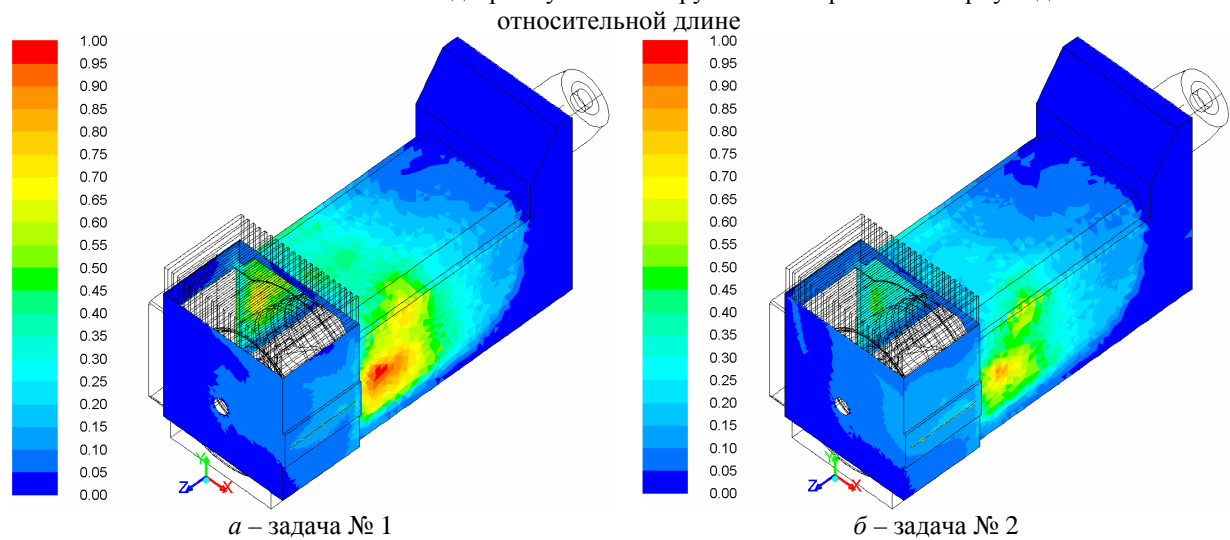


Рис. 3 – Расчётный относительный подогрев наружных поверхностей ОКУ

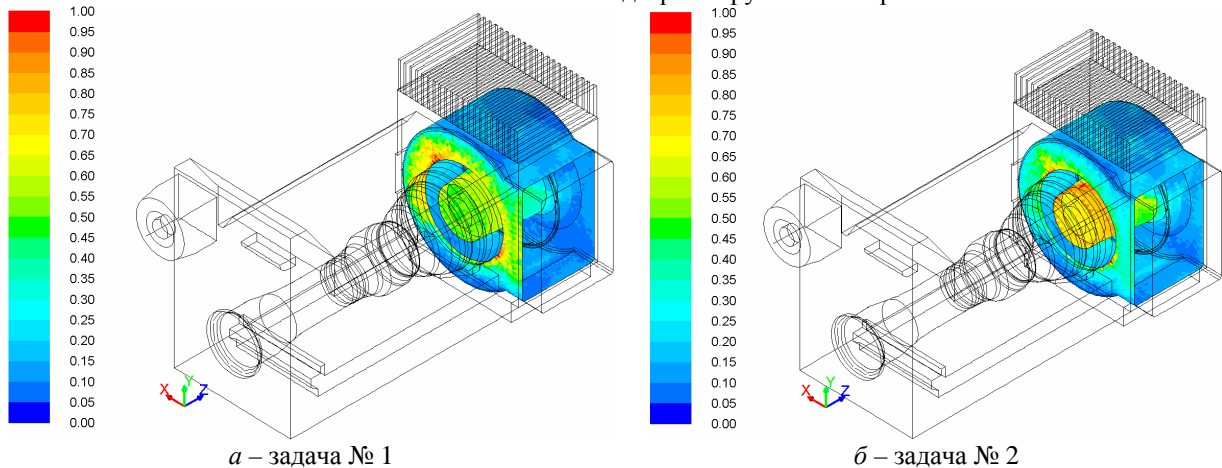


Рис. 4 – Расчётный относительный подогрев наружных поверхностей улитки



Численное интегрирование ДУЧП осуществлялось итерационно методом контрольного объёма с использованием схемы аппроксимации конвективных членов первого порядка точности «против потока» [15]. Уравнение неразрывности в пределе малых чисел Маха удовлетворялось с помощью процедуры коррекции давления *SIMPLE* [16]. Уравнение переноса излучения решалось методом дискретных ординат [13].

Расчёты показали, что в обеих задачах течение ВВ внутри укрытия имеет сложную несимметричную пространственную структуру с множеством застойных зон. Воздух, проходя по укрытию и обтекая двигатель, нагревается от горячих наружных поверхностей его корпуса и облучаемых им деталей. Аналогичные процессы происходят вокруг улитки. Наибольшие температуры воздух имеет в областях между двигателем и подмоторной рамой, около наиболее нагретых участков двигателя и в застойной зоне около кожуха муфты. Из рис. 3 видно, что правая стенка укрытия нагревается в большей степени, чем левая. Максимальные температуры имеют наружные поверхности ОКУ в районе турбины (см. рис. 3) и передняя стенка улитки (рис. 4) вследствие излучения высокотемпературных участков корпуса двигателя.

Использование гипотетической термограммы с уменьшенными на 10 % температурами участков наружной поверхности корпуса двигателя и меньших степеней черноты поверхностей ТТ привело к значительному снижению температур ОКУ и, в меньшей степени, к уменьшению температуры воздуха на выходе из него. Это объясняется сильным влиянием указанных параметров на лучистую составляющую теплового потока от высокотемпературных участков поверхностей корпуса двигателя и улитки. Фактическое завышение температур участков наружной поверхности корпуса двигателя, обдуваемого охлаждающим воздухом, обусловленное использованием в задаче № 1 термограммы, измеренной в условиях без обдува двигателя, приводит к завышенным численным оценкам температур облучаемых им поверхностей ОКУ.

Полученные результаты численного моделирования качественно согласуются с данными натурных испытаний укрытий КС.

### **Заключение**

Сформулирована общая постановка задачи о тепловом состоянии укрытия ГТД и разработана соответствующая ММ, позволяющая анализировать движение ВВ внутри укрытия и температуру в каждой точке расчётной области, включая наружные и внутренние стенки укрытия, при различных режимах эксплуатации ГТД в составе ГПА. Выполнено численное исследование теплового состояния укрытия ГТД при различных ГУ, показавшее высокую чувствительность расчётных оценок температур ОКУ к температурам наружной поверхности корпуса двигателя и степеням черноты поверхностей ТТ.

Направления дальнейших исследований авторы видят:

- в разработке методики коррекции термических и гидродинамических ГУ с учётом режимов работы ГТД, вентиляторов и положения регулирующих органов;
- в учёте тепловыделений от оборудования;
- в учёте утечек ЦВ и ВГ;
- в учёте теплопроводности через «тепловые мостики» деталей ОКУ и улитки.

**Список литературы:** 1. Шляпин, Я.К. Математическое моделирование тепловых режимов отсеков ГПА [Текст] / Я.К. Шляпин // Газовая промышленность. – 2008. – № 2. – С. 16-19. 2. Ключков, А.В. Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования [Текст] / А.В. Ключков, Е.С. Корнилова, А.А. Снитко // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 8. – С. 20-22. 3. Results and Experience from Ge

Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Text] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi // Proceedings of ASME TurboExpo 2005. – Reno, Nevada, USA. – June 6-9, 2005. GT2005-68053. – 9 p. **4.** Исследование структуры течения охлаждающего воздуха в шумотеплозащитном кожухе газотурбинной установки [Текст] / П.В. Трусов, А.В. Харченко, И.Р. Кац, А.М. Печенкина, О.В. Погребнова // Транспорт и подземное хранение газа. – 2007. – № 1. – С. 20-24. **5.** Исследование газодинамических характеристик шумотеплоизолирующего кожуха газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата при аварийном отключении вентиляторов системы охлаждения [Текст] / П.В. Трусов, Д.А. Чарнцев, И.Р. Кац, В.В. Мокшанов, А.М. Печенкина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 9. – С. 27-29. **6.** Месропян, А.В. Численное моделирование газодинамики и тепломассопереноса в системе охлаждения бокса ГТД [Текст] / А.В. Месропян, И.И. Мухамедзянова // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 25-31. **7.** Трусов, П.В. Численное моделирование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки [Текст] / П.В. Трусов, Д.А. Чарнцев // Вестник СамГУ. – Естественная серия. – 2010. – № 4 (78). – С. 117-126. **8.** Трусов, П.В. Исследование теплового состояния шумотеплоизолирующего кожуха газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата [Текст] / П.В. Трусов, Д.А. Чарнцев, А.М. Печенкина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 8-10. **9.** Чарнцев, Д.А. Математическое моделирование теплового состояния шумотеплоизолирующих кожухов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18 / Чарнцев Дмитрий Анатольевич; Пермский нац. иссл. политех. ун-т. – Пермь, 2012. – 16 с. **10.** Алексеев, Б.В. Физическая газодинамика реагирующих сред [Текст]: учеб. пособие для вузов / Б.В. Алексеев, А.М. Гришин. – М.: Высшая школа, 1985. – 464 с. **11.** Кортиков, Н.Н. Совершенствование подходов к моделированию теплового состояния лопаток высокотемпературных газовых турбин с конвективно-плёночной системой охлаждения [Текст] / Н.Н. Кортиков // Газотурбинные технологии. – 2011. – № 4. – С. 44 – 48. **12.** Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с. **13.** Суржигов, С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы [Текст] / С.Т. Суржигов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 544 с. **14.** Launder, B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p. **15.** Лоханский, Я.К. Основы вычислительной гидромеханики и тепломассообмена [Текст] / Я.К. Лоханский. – М.: МГИУ, 2008. – 80 с. **16.** Vandoormaal, J.P. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows [Text] / J.P. Vandoormaal, G.D. Raithby // Numer. Heat Transfer. – 1984. – № 7. – P. 147-163.

Поступила в редколлегию 15.01.13

УДК [517:536]:621.452

**Численное моделирование теплового состояния укрытия газотурбинного двигателя для привода газоперекачивающего агрегата** [Текст] / В.Е. Костюк, Е.И. Кириладзе // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 13(987). – С. 63-72. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2078-774X.

Розроблено загальну постановку задачі про тепловий стан укриття ГТД для приводу ГПА і відповідну їй математичну модель. Результати числового моделювання виявили високу чутливість розрахункових оцінок температур огорожувальних конструкцій укриття до температур зовнішньої поверхні корпусу двигуна і ступенів чорноти поверхонь твердих тіл.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, шумотеплозахисне укриття, вентиляція, охолодження, течія і тепломасообмін, осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, рівняння переносу випромінювання, метод контрольних об'ємів, метод дискретних ординат, температурні поля.

General statement of the problem of the gas-turbine-driven compressor plant enclosure heat state and appropriate mathematical model are developed. Numerical simulation results showed that enclosure envelopes temperatures numerical evaluations are highly sensitive to the engine case outer surface temperatures and solid surfaces emissivities.

**Keywords:** gas-turbine, sound and heat proofing, ventilation, cooling, flow, heat and mass transfer, Reynolds averaged Navier-Stokes equations, radiation transfer equation, finite volume method, discrete ordinate method, temperature fields.